

## О ВЛИЯНИИ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО ГРАНУЛЯТОРА-СУШИЛКИ НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ПРОДУКТА

В. Я. Борщев<sup>1</sup>, В. А. Пронин<sup>2</sup>

*Кафедры: «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» (1),  
«Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (2),  
borschov@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** барабанный гранулятор-сушилка; гранулирование; оптимизация параметров; сыпучий материал.

**Аннотация:** В целях оптимизации параметров технологической схемы гранулирования и сушки минеральных удобрений проведено исследование эксплуатационных параметров барабанного гранулятора-сушилки (БГС). С помощью аппарата математической статистики проведено исследование влияния режимных и конструктивных параметров аппарата БГС на гранулометрический состав материала после гранулирования. Совместный анализ матриц коэффициентов корреляции исследуемых переменных позволил разработать рекомендации по обеспечению устойчивого режима работы БГС.

---

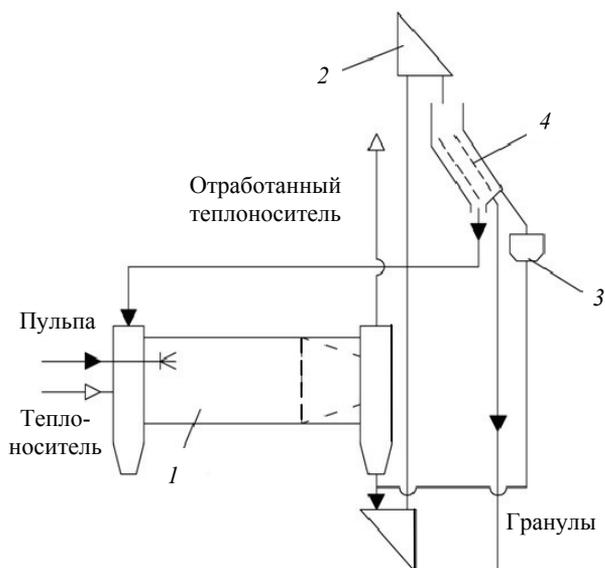
### Введение

Широкое применение барабанных грануляторов-сушилок (БГС) в производстве минеральных удобрений [1] обусловлено совмещением и интенсификацией процессов гранулирования, сушки и частичной классификации сыпучего материала в одном аппарате, в результате чего уменьшается количество единиц оборудования в технологической схеме производства.

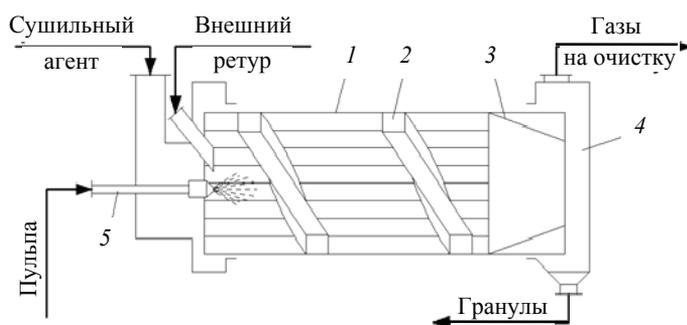
Анализ технологической схемы гранулирования и сушки удобрений с применением аппарата БГС (рис. 1) свидетельствует об определяющей зависимости ее технико-экономических параметров от особенностей кинетики процесса, который происходит в зоне распыливания пульпы гранулятора-сушилки [2 – 6]. Это обусловлено тем, что нормальная эксплуатация БГС характеризуется образованием стационарных внутреннего и внешнего циркуляционных потоков гранулированного материала.

Внутренний поток, транспортирующийся с помощью обратного шнека 2, состоит преимущественно из мелких частиц, образующих в поперечном сечении барабана завесу, на которую пневматической форсункой 5 распыливается пульпа (рис. 2). Внешний поток формируется с помощью внешних транспортных устройств, которые возвращают мелкую нетоварную фракцию во внутренний циркуляционный поток на повторное циклическое орошение.

Мелкие частицы сосредотачиваются в основном во внутреннем потоке вследствие классификации образовавшихся гранул во встроенном конусном классификаторе 3 на выходе из барабана. Нетоварная фракция получается при классификации выходящего из аппарата гранулированного материала с помощью



**Рис. 1. Схема технологического узла гранулирования и сушки минеральных удобрений:**  
1 – БГС; 2 – нория; 3 – дробилка; 4 – грохот



**Рис. 2. Схема барабанного гранулятора-сушки:**  
1 – барабан; 2 – обратный шнек; 3 – конусный классификатор;  
4 – разгрузочная камера; 5 – пневматическая форсунка

вибрационного грохота. В состав нетоварной фракции входят мелкие гранулы, размер которых должен быть увеличен до размера товарной фракции, и мелкие частицы, получающиеся после измельчения крупной нетоварной фракции и отделения в результате повторной классификации.

В зависимости от особенностей кинетики процесса гранулирования и сушки, который протекает в зоне распыливания пульпы БГС, внешний и внутренний циркуляционные потоки могут значительно изменяться как качественно, так и количественно. Это оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели работы оборудования. В частности, при увеличении внешнего потока происходит снижение данных показателей вследствие роста энергетических затрат на транспортирование и классификацию гранулированного материала. При этом одновременно увеличиваются тепловые потери и выделение пыли в производственное помещение. Значительное влияние на снижение технико-экономических показателей оказывает наличие крупной нетоварной фракции

во внешнем потоке. Это обусловлено тем, что мелкую нетоварную фракцию можно рассматривать, по сути, в виде полупродукта производства. В то же время крупную фракцию, являющуюся в определенной степени «браком производства», необходимо утилизировать. Данная операция может быть реализована с использованием таких энергоемких процессов, как измельчение, классификация и др.

Цель работы – оптимизация параметров технологической схемы гранулирования и сушки минеральных удобрений.

### Экспериментальная часть

Для оптимизации параметров технологической схемы гранулирования и сушки минеральных удобрений выполнен статистический анализ взаимосвязи параметров и эксплуатационных характеристик аппарата с использованием аппарата БГС типовой конструкции, имеющего диаметр 3,2 и длину 20 м [1]. С помощью метода пошаговой множественной регрессии по стандартной программе проведен анализ двух параллельно работающих аппаратов БГС [7]. Готовый продукт в этих конструктивно аналогичных аппаратах характеризовался существенно разным гранулометрическим составом. При этом содержание товарной фракции в продукте было практически одинаковым. В то же время в нетоварной фракции на одном из них преобладали крупные гранулы, а на другом – мелкие.

С помощью аппарата математической статистики в работе проведено исследование влияния режимных и конструктивных параметров аппарата БГС на параметр оптимизации. На основании технологического назначения процесса гранулирования и сушки в качестве параметра оптимизации выбран гранулометрический состав материала после гранулирования. В качестве критерия оптимальности гранулометрического состава использован выход товарной фракции за вычетом содержания крупной фракции.

Выбор параметра оптимизации в таком виде обусловлен тем, что одна величина выхода товарной фракции не полностью соответствует требованию универсальности и полноты, так как не дает представление о процессе гранулирования в экономическом аспекте. Действительно, по экономическим соображениям, важно, какое количество крупной нетоварной фракции содержится в гранулированном материале. Это связано с тем, что измельчение и классификация крупной нетоварной фракции требуют дополнительных затрат энергии. В то же время мелкая нетоварная фракция, используемая в качестве ретура, фактически представляет собой полупродукт стадии гранулирования.

В процессе статистической обработки эксплуатационных параметров двух конструктивно аналогичных параллельно работающих промышленных БГС в производстве гранулированного аммофоса исследовано взаимное влияние 13 переменных:  $p_1$ ,  $p_2$  – температуры теплоносителя на входе и выходе аппарата соответственно;  $p_3$ ,  $p_4$ ,  $p_5$  – расход, рН и влажность пульпы соответственно;  $p_6$ ,  $p_7$  – центральное и боковое давления соответственно;  $p_8$  – номер аппарата;  $p_9$  – комплексный параметр, характеризующий качество гранулометрического состава продукта на выходе из аппарата;  $p_{10}$  – средний диаметр гранул выходного продукта;  $p_{11}$  – дисперсия фракционного состава выходного продукта;  $p_{12}$ ,  $p_{13}$  – соответственно доли крупной и мелкой нетоварной фракции в выходном продукте.

Регистрацию параметров  $p_1$  –  $p_7$  проводили с помощью заводских приборов. Параметры  $p_9$  –  $p_{13}$  определяли по отбираемым на выходе из гранулятора

проб готового продукта, которые подвергались в дальнейшем рассеиванию по фракциям. Полученные в результате кривые распределения выходного продукта по размерам обрабатывали для расчета параметров  $p_{10} - p_{13}$  по известным зависимостям, а параметр  $p_9$  определяли по формуле

$$p_9 = 1 - p_{13} - 2p_{12}.$$

В процессе исследования выполнено 100 измерений по каждому параметру. Измерения проводили сериями по три замера в каждой с промежутком между замерами, равным 10 минут. Отбор проб готового продукта осуществляли спустя примерно 0,35 часа (это среднее время пребывания гранулированного материала в барабане) после измерения переменных  $p_1 - p_7$ . При этом каждая серия замеров составила одно наблюдение для статистического анализа путем усреднения значений каждой переменной, что позволило исключить вероятность получения ложных корреляций. В результате для статистического анализа подготовлено 33 наблюдения о 13 переменных.

### Обсуждение результатов и выводы

В результате анализа статистической информации с помощью аппарата математической статистики [7] получены матрица коэффициентов корреляций для всех 13 переменных (эксплуатационных характеристик аппарата БГС) по всем проведенным наблюдениям, средние величины переменных и их стандартные отклонения. Анализ коэффициентов корреляции между переменной  $p_8$  и другими переменными позволил установить наличие статистически значимого различия в режимах работы обоих аппаратов. Это подтверждается тем, что коэффициенты взаимной корреляции для основных параметров при сравнительно высокой их значимости имеют для двух аппаратов БГС различные знаки. Кроме того, гранулометрический состав готового продукта как качественно, так и количественно значительно отличается для двух аппаратов. При этом готовый продукт, характеризующийся одинаковым содержанием доли товарной фракции, содержит нетоварную фракцию в одном аппарате преимущественно в виде крупных, а в другом – мелких гранул. Следовательно, полученные в результате анализа данные являются неоднородными, что, как известно, может привести к ложной корреляции. По этой причине попытки разработки общей для обоих аппаратов статистической модели не привели к положительным результатам, и грануляторы-сушилки рассмотрены по отдельности. Для каждого из них получена матрица корреляций и регрессионные уравнения, которые связывают режимные параметры с параметром оптимизации  $p_9$  и целевыми функциями  $p_{10}$ ,  $p_{12}$ ,  $p_{13}$  (характеристиками гранулометрического состава).

Совместный анализ матриц коэффициентов корреляции исследуемых переменных, полученных отдельно для каждого аппарата, позволил установить разный подход к обеспечению устойчивого режима работы двух барабанных грануляторов-сушилок. Так, например, корреляционная зависимость температуры теплоносителя на входе и расхода пульпы для БГС-1 положительна, а для БГС-2 – отрицательна. Следовательно, для БГС-1 при росте температуры теплоносителя расход пульпы увеличивается, а для БГС-2 – наоборот уменьшается. Также имеют противоположные знаки и в то же время значимую абсолютную величину коэффициенты корреляции между расходом пульпы и параметром оптимизации  $p_9$ . Установленные различия коэффициентов корреляции свидетельствуют о том, что в качестве основного фактора, который определяет это различие, следует рас-

смаатривать влияние неучтенных случайно возникающих конструктивных особенностей аппаратов. Очевидно, что соответствующие конструктивные особенности должны существенно влиять на условия взаимодействия потока диспергированной пульпы и падающего слоя частиц. Это в полной мере подтверждается результатами исследований, представленных в работах [8, 9].

Анализ взаимосвязи параметра оптимизации  $p_9$  и целевых функций  $p_{12}$ ,  $p_{13}$  с режимными параметрами выполнен с применением аппарата пошаговой множественной регрессии [7]. В результате расчетов получены уравнения, описывающие зависимость параметра оптимизации и целевых функций (характеристик гранулометрического состава) от переменных  $p_1 - p_7$  для каждого аппарата БГС. Ниже приведены уравнения регрессии только для параметров  $p_9$  и  $p_{12}$ :

– для БГС-1

$$p_9 = 0,337 - 0,0141p_3 + 0,0037p_2 + 0,0084p_5 + 0,011p_6;$$

$$p_{12} = -0,015 + 0,0066p_3 - 0,001p_2 + 0,02p_7;$$

– для БГС-2

$$p_9 = 0,412 + 0,0386p_3 + 0,263p_7 - 0,345p_4 - 0,0247p_5 + 0,00129p_1;$$

$$p_{12} = 0,028 + 0,001p_3 - 0,026p_7 + 0,00015p_1.$$

Анализ полученных уравнений свидетельствует, что увеличение параметров оптимизации на БГС-1 можно обеспечить путем уменьшения расхода пульпы, а на БГС-2 – путем его увеличения.

Проведенный статистический анализ результатов наблюдений также показал, что множественные коэффициенты регрессии малы. Вследствие этого управление гранулометрическим составом материала в промышленных условиях потребует значительного изменения основных режимных характеристик (температуры, расхода пульпы, сжатого воздуха и т.д.), что может стать причиной повышения нестабильности работы аппарата и снижения его производительности.

Анализ литературных источников [2 – 6] с учетом кинетических закономерностей гранулообразования в БГС позволяет сделать вывод о том, что эффективный способ повышения технико-экономических показателей функционирования технологической линии (см. рис. 1) может быть использование принципа управления сегрегированными потоками неоднородных частиц [10 – 15]. Применение данного принципа позволит управлять потоками частиц различного размера, обеспечивая концентрирование мелких из них в зоне гранулообразования в головной части барабана и вывод достаточно крупных товарных гранул из аппарата. В результате представляется возможным свести к минимуму величину потока ретурра во внешнем циркуляционном контуре при соответствующем снижении энергозатрат.

#### *Список литературы*

1. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М. : Химия, 1991. – 240 с.
2. Математическая модель процесса гранулирования в барабанном грануляторе-сушилке / С. П. Рудобашта, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин, А. А. Уколов // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Т. 20, № 4. – С. 441 – 446.
3. Хабарова, Е. В. К расчету вероятности столкновения капель пульпы с гранулами завесы в аппарате БГС / Е. В. Хабарова, В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1995. – Т. 1, № 3-4. – С. 304 – 310.

4. Долгунин, В. Н. Моделирование процесса гранулирования в барабанном грануляторе-сушилке (БГС) / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев, Е. В. Хабарова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 7 – 11.
5. Долгунин, В. Н. Взаимодействие газожидкостного потока с падающим слоем частиц материала в барабанном грануляторе-сушилке / В. Н. Долгунин, Е. В. Хабарова, В. Я. Борщев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1997. – Т. 3, № 4. – С. 257 – 262.
6. Хабарова, Е. В. Моделирование динамики процесса гранулирования в барабанных грануляторах-сушилках / Е. В. Хабарова, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2002. – Т. 8, № 2. – С. 240 – 245.
7. Сборник научных программ на Фортране : руководство для программиста. Вып. 1. Статистика / пер. с англ. С. Я. Виленкина. – М. : Статистика, 1974. – 316 с.
8. Оценка гидромеханики движения материала в барабанном грануляторе-сушилке и совершенствование его конструкции / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев, А. А. Уколов [и др.] // Химическая промышленность. – 1986. – Т. 63, № 7. – С. 422 – 425.
9. Иванов, О. О. Эффекты разделения частиц в завесе барабанного насадочного аппарата / О. О. Иванов, В. Я. Борщев, В. Н. Долгунин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 8. – С. 13 – 15.
10. Технологические возможности управления структурой потоков в барабанном теплообменном аппарате / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. Н. Куди [и др.] // Химическая технология. – 2012. – Т. 13, № 10. – С. 600 – 606.
11. Dolgunin, V. N. Processing of Nonuniform Granular Materials in Operation Segregated Flows / V. N. Dolgunin, O. O. Ivanov, A. A. Ukolov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 321 – 327.
12. Повышение эффективности барабанного аппарата путем управления сегрегированными потоками зернистых материалов / О. О. Иванов, А. Н. Куди, В. Н. Долгунин, Ю. В. Шарый // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2011. – № 2-3 (320-321). – С. 89 – 92.
13. Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. А. Уколов, А. Н. Куди // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 303 – 313. doi: 10.7868/S0040357114040010
14. Долгунин, В. Н. Процессы и оборудование для переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках : монография / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2011. – 120 с.
15. Долгунин, В. Н. Процессы и оборудование с управляемыми сегрегированными потоками дисперсной твердой фазы / В. Н. Долгунин // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., 08–09 сентября 2016 г., Москва. – М., 2016. – Т. 1. – С. 67 – 75.

---

## The Influence of Mode and Design Parameters of the Drum Granulator-Dryer on the Fractional Composition of the Product

V. Ya. Borshchev<sup>1</sup>, V. A. Pronin<sup>2</sup>

*Departments of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (1),  
Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries (2),  
borshchov@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** drum granulator-dryer; granulation; parameter optimization; bulk material.

**Abstract:** In order to optimize the parameters of the technological scheme of granulation and drying of mineral fertilizers, a study was made of the operational parameters of a drum granulator-dryer. Using the apparatus of mathematical statistics, a study was made of the influence of the operational and structural parameters of the apparatus of the drum granulator-dryer on the particle size distribution of the material after granulation. A joint analysis of the matrices of correlation coefficients of the studied variables made it possible to develop recommendations for ensuring a stable operation of the drum granulator-dryer.

### References

1. Klassen P.V., Grishayev I.G., Shomin I.P. *Granulirovaniye* [Granulation], Moscow: Khimiya, 1991, 240 p. (In Russ.)
2. Rudobashta S.P., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N., Ukolov A.A. [A mathematical model of the granulation process in a drum granulator-dryer], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 1986, vol. 20, no. 4, pp. 441-446. (In Russ.)
3. Khabarova Ye.V., Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya. [On the calculation of the probability of collision of pulp drops with the curtain granules in the apparatus of the BGS], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1995, vol. 1, no. 3-4, pp. 304-310. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya., Khabarova Ye.V. [Modeling of the granulation process in a drum granulator-dryer (BGS)], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and oil and gas engineering], 1997, no. 4, pp. 7-11. (In Russ.)
5. Dolgunin V.N., Khabarova Ye.V., Borshchev V.Ya. [Interaction of a gas-liquid flow with a falling layer of material particles in a drum granulator-dryer], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1997, vol. 3, no. 4, pp. 257-262. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Khabarova Ye.V., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N. [Modeling the dynamics of the granulation process in drum granulators / dryers], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 240-245. (In Russ., abstract in Eng.)
7. *Sbornik nauchnykh programm na Fortrane: rukovodstvo dlya programmista. Vyp. 1. Statistika* [Collection of scientific programs on Fortran: a guide for the programmer. Vol. 1. Statistics], Moscow: Statistika, 1974, 316 p. (In Russ.)
8. Dolgunin V.N., Borshchev V.Ya., Ukolov A.A., Budantsev V.I., Kuznetsov V.I., Senatorov Yu.P., Volkov V.V. [Evaluation of the hydromechanics of material movement in a drum granulator-dryer and improvement of its design], *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 1986, vol. 63, no. 7, pp. 422-425. (In Russ.)
9. Ivanov O.O., Borshchev V.Ya., Dolgunin V.N. [Effects of particle separation in the curtain of a drum nozzle], *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2009, no. 8, pp. 13-15. (In Russ.)
10. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Kudi A.N., Ukolov A.A., Karev V.I. [Technological capabilities of controlling the structure of flows in a drum heat and mass transfer apparatus], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology], 2012, vol. 13, no. 10, pp. 600-606. (In Russ.)
11. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. Processing of Nonuniform Granular Materials in Operation Segregated Flows, *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 321-327. (In Eng., abstract in Russ.)
12. Ivanov O.O., Kudi A.N., Dolgunin V.N., Sharyy Yu.V. [Improving the efficiency of the drum apparatus by controlling segregated flows of granular materials], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Food technology], 2011, no. 2-3 (320-321), pp. 89-92. (In Russ.)

13. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Kudi A.N. [Processes for the processing of granular materials in controlled segregated flows], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 2014, vol. 48, no. 4, pp. 303-313, doi: 10.7868/S0040357114040010 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Dolgunin V.N., Ivanov O.O. *Protsessy i oborudovaniye dlya pererabotki zernistykh materialov v upravlyayemykh segregirovannykh potokakh: monografiya* [Processes and equipment for the processing of granular materials in controlled segregated flows: monograph], Tambov: Izdatel'stvo TGTU, 2011, 120 p. (In Russ.)

15. Dolgunin V.N. *Povysheniye effektivnosti protsessov i apparatov v khimicheskoy i smezhnykh otraslyakh promyshlennosti* [Improving the efficiency of processes and apparatuses in the chemical and related industries], Proceedings of the International Scientific and Technical conferences, 08-09 September, 2016, Moscow, 2016, vol. 1, pp. 67-75. (In Russ.)

---

### **Über den Einfluss von Modus- und Konstruktionsparametern des Trommel-Granulator-Trockners auf fraktionierte Zusammensetzung des Produkts**

**Zusammenfassung:** Um die Parameter des technologischen Schemas der Granulierung und Trocknung von Mineraldüngern zu optimieren, wurden die Betriebsparameter des Trommelgranulator-trockners untersucht. Unter Verwendung des Apparats der mathematischen Statistik wurde die Untersuchung des Einflusses der Betriebs- und Strukturparameter des Gerätes auf die Partikelgrößenverteilung des Materials nach der Granulierung durchgeführt. Die gemeinsame Analyse der Matrizen der Korrelationskoeffizienten der untersuchten Variablen ermöglichte es, Empfehlungen zur Gewährleistung der stabilen Betriebsart des Trommelgranulator-trockners zu entwickeln.

---

### **Sur l'influence des paramètres de mode et de conception du granulateur à tambour-sécheur sur la composition fractionnée du produit**

**Résumé:** Afin d'optimiser les paramètres du schéma technologique de granulation et de séchage des engrais minéraux, est réalisée une étude des paramètres de fonctionnement du granulateur-sécheur à tambour. À l'aide d'un appareil de statistiques Mathématiques, est réalisée une étude sur l'influence des paramètres de mode et de conception de l'appareil BGS sur la composition granulométrique du matériau après la granulation. L'analyse conjointe des matrices des coefficients de la corrélation des variables étudiées a permis d'élaborer des recommandations pour assurer un fonctionnement stable du granulateur-sécheur à tambour.

---

**Авторы:** *Борщев Вячеслав Яковлевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Пронин Василий Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.